

# Estudio de capas de desacoplo de InGaAs/GaAs(001) por crecimiento combinado de MBE-ALMBE en forma dinámica y escalonada

M. HERRERA, D. GONZÁLEZ, M. U. GONZÁLEZ<sup>1</sup>, Y. GONZÁLEZ<sup>1</sup>, L. GONZÁLEZ<sup>1</sup>, R. GARCÍA

Departamento de Ciencia de los Materiales e I.M. y Q.I., Universidad de Cádiz, Apartado 40, 11510 Puerto Real, Cádiz, España.

<sup>1</sup>Instituto de Microelectrónica de Madrid, C/ Isaac Newton, 8 (PTM), 28760-Tres Cantos, Madrid, España

El estudio mediante Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) de capas InGaAs/GaAs(001) crecidas a 200°C reflejó la existencia de una red de dislocaciones de Lomer en el seno de la capa, muy prometedora para la efectiva relajación de la estructura con una disminución en la densidad de dislocaciones de propagación. Sin embargo, la capa presentaba un grado de relajación deficiente, por lo que resultaba metaestable. Con el fin de aprovechar las ventajas que ofrecía dicha red de Lomer, se crecieron capas de desacoplo a 200°C seguidas de una capa a 400° o 500°C (en forma dinámica y escalonada) para relajar completamente la estructura. No obstante, no se consiguió reproducir la mencionada red, observándose otra constituida por dislocaciones de 60°, situada en la zona de cambio entre las dos temperaturas de crecimiento utilizadas. Las razones de este cambio se discuten en el trabajo.

*Palabras clave:* relajación, dislocaciones de Lomer, capas amortiguadoras, InGaAs/GaAs(001), TEM

## Study of InGaAs/GaAs(001) buffers by combined growth of ALMBE-MBE in dynamic or stepped way

Transmission Electron Microscopy study of low temperature (200° C) grown InGaAs/GaAs(001) layers showed an unexpected Lomer dislocation network in the middle of the layer, which appears as a promising one for the effective structure relaxation without a high density of threading dislocations. However, the layer remained metastable, due to a lack in the relaxation degree. To take advantage of such a network, buffers layers were grown at 200° C by ALMBE, followed by a layer grown at 400°C or 500°C (in a dynamic and a stepped way), in order to reach the complete relaxation of the structure. Nevertheless, the Lomer network did not appear, substituted by a 60° dislocations one, placed in the region with the growth temperature change. The reasons of this change are discussed.

*Keywords:* relaxation, Lomer dislocation, buffer, InGaAs/GaAs(001), TEM

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria optoelectrónica se encuentra sujeta a la optimización del crecimiento epitaxial de heteroestructuras semiconductoras con ancho de banda prohibida adecuado para el desarrollo de sus dispositivos. En este sentido, la introducción de capas de desacoplo (CD) entre el sustrato y las capas de interés se perfila como una opción adecuada para controlar los defectos reticulares característicos en estos sistemas. El trabajo que se propone se enfoca a un nuevo diseño de capas de desacoplo, donde se aprovechen las características microestructurales observadas al crecer a baja temperatura, como la aparición de una red de dislocaciones de Lomer situadas en el seno de la epicapa. Estos defectos relajan la estructura más eficientemente que las dislocaciones de 60°, por lo que habrá una disminución en la cantidad de dislocaciones de propagación que puedan deslizar y atravesar el dispositivo, lo que supone una ventaja estructural fundamental para el crecimiento epitaxial de heteroestructuras con fines optoelectrónicos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

En el presente trabajo se estudian dos capas simples y tres CD de InGaAs/GaAs(001) con 20% de In. Las capas simples CS300 y CS300Ct (de 300 nm de espesor de epicapa) han sido crecidas por Epitaxia de Haces Moleculares de Capa Atómica (ALMBE) a 200°C, sufriendo CS300Ct un ciclo térmico posterior al crecimiento a 500°. Respecto a las CD, todas tienen 400 nm de espesor, siendo crecida la primera mitad por ALMBE a 200°C. En las CD llamadas D-MBE y E-MBE, la segunda

mitad de la capa se obtuvo por Epitaxia de Haces Moleculares (MBE) a 500°C; en E-ALMBE, los últimos 200 nm se crecieron por ALMBE a 400° C. Las estructuras escalonadas (E-MBE y E-ALMBE) han sido crecidas en dos pasos, ya que tras obtener los primeros 200 nm, se detiene el proceso para aplicar un ciclo térmico a 500°. Sin embargo, en la estructura dinámica D-MBE, a mitad de la capa se cambian las condiciones a las correspondientes de MBE sin parar el crecimiento hasta concluir el proceso. Las muestras descritas fueron estudiadas por TEM en un JEOL 1200 EX en visión planar (PV-) y sección transversal (X-), así como por Difracción de Rayos X de Doble Cristal.

## 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El estudio por XTEM de CS300Ct mostró que esta estructura presenta una relajación deficiente y asimétrica, ya que la densidad de dislocaciones de desajuste (DD) en  $\bar{1}10$  es de  $19 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$  y en  $110$ , de  $7.5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ . Además, reveló la existencia de una red de dislocaciones paralela a la intercara pero situada en el seno de la capa, en su mitad superior, con línea de dislocación en la dirección  $110$ . Del estudio de dicha red mediante PVTEM se dedujo que las dislocaciones observadas eran de arista o de Lomer, deslizando en una sola dirección. Sin embargo, en CS300 no aparece red alguna en el seno de la capa, resaltando la baja densidad de DD observada en esta muestra ( $4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ , aprox.). Esto indica que las dislocaciones encontradas en CS300Ct se formaron en el ciclo térmico, y no durante el crecimiento.

La red de dislocaciones de Lomer observada en **CS300Ct** ofrece grandes expectativas para la mejora de la calidad cristalina de las CD de InGaAs/GaAs, ya que estos defectos se desplazan por escalada, proceso más costoso energéticamente que asegura que dichas dislocaciones no se moverán posteriormente. Además, provocan una relajación mayor que las DD de  $60^\circ$ , por lo que se necesita una menor densidad para relajar la estructura y por tanto, disminuye la cantidad de fragmentos de propagación que acompañan la formación de DD. Sin embargo, esta estructura presenta una relajación deficiente, por lo que en las CD consideradas se creció la mitad superior a alta temperatura, para intentar de este modo relajar completamente la estructura.

Dichas CD también fueron estudiadas inicialmente por XTEM, revelándose la presencia en cada una de ellas de redes de dislocaciones a una altura ligeramente inferior a la mitad de la capa, como se muestra en la figura 1 para **E-MBE**. El estudio por PVTEM de **D-MBE** y **E-MBE** demostró que ambas muestras son bastante similares entre sí, presentando fragmentos de dislocación en las dos direcciones  $\langle 110 \rangle$ , a diferencia de lo observado para **CS300Ct**. Además, cabe destacar que sólo un tercio aprox. de las dislocaciones observadas es de Lomer, siendo las demás dislocaciones de  $60^\circ$ . En **E-ALMBE**, sin embargo, aparece una red ortogonal de dislocaciones de  $60^\circ$  perfectamente formada y mucho más densa que en las estructuras anteriores (del orden de  $5 \cdot 10^4 \text{cm}^{-1}$ ), con una fracción pequeña de dislocaciones de Lomer (figura 2). Por otro lado, el estudio por Rayos X de estas tres estructuras mostró que se encuentran relajadas en torno a un 70% del desajuste reticular.

#### 4. DISCUSIÓN

Tanto en la estructura constituida por una capa simple recocida como en las CD con mitad de capa crecida por MBE se han observado dislocaciones de Lomer paralelas a la intercara pero situadas en el seno de la epicapa. En la bibliografía científica se han propuesto diversos mecanismos para la formación de dislocaciones de Lomer, como el de Fitzgerald (1), que propone la reacción de dos dislocaciones de  $60^\circ$  que se encuentren en su deslizamiento por planos  $\{111\}$  con el resultado de la formación de una de  $90^\circ$ . Sin embargo, la probabilidad de que se encuentren en mitad de la capa dos dislocaciones de  $60^\circ$  con vector de Burgers adecuado para reaccionar produciendo una dislocación de Lomer es bastante baja, por lo que no se considerará este proceso como el origen de las dislocaciones observadas.

Otro posible mecanismo de formación de dichos defectos sería el de nucleación en la superficie de la muestra y posterior movimiento por escalada hacia la intercara, donde una dislocación pasa de su plano de deslizamiento a otro paralelo mediante una difusión de las vacantes existentes en el material. En referencia a esto, varios autores (2,3) han postulado que el crecimiento a baja temperatura de estructuras III-V induce a la existencia de una alta concentración de As en exceso, lo cual produce vacantes del grupo III, susceptibles de difundir bajo un tratamiento térmico (4). Además, diversos estudios han mostrado que el coeficiente de difusión de las vacantes de Ga es muy elevado (2). Según esto, en la muestra **CS300Ct** y en las CD, crecidas a baja temperatura y con un posterior aumento de temperatura, deberá existir una alta concentración de vacantes de Ga que difundirán al subir la temperatura, lo cual podría provocar un proceso de escalada de dislocaciones. Así pues, la aparición de dislocaciones de Lomer en estas muestras podría producirse por nucleación superficial, seguida de un movimiento por escalada hasta su posición final mediante la difusión de vacantes de Ga. El hecho de que el número de vacantes de Ga, aunque elevado, sea limitado, frenará la escalada de dichas dislocaciones evitando que alcancen la intercara, de modo que ésta podría ser la causa de que permanezcan en la posición observada.

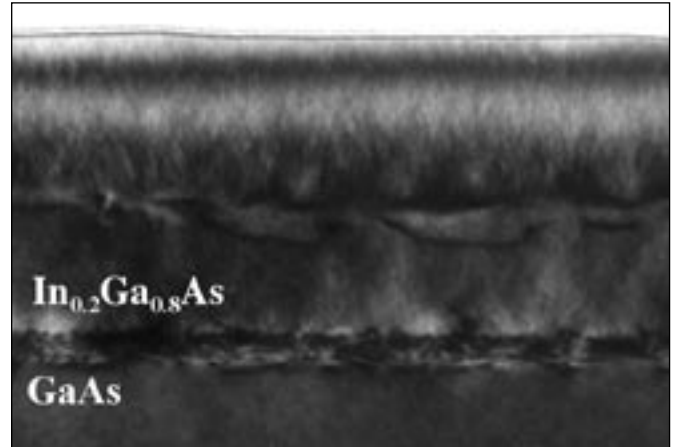


Fig. 1. Micrografía de TEM en Sección Transversal con la reflexión 220 para la estructura E-MBE, donde se observa la red de dislocaciones que desliza a mitad de la capa.

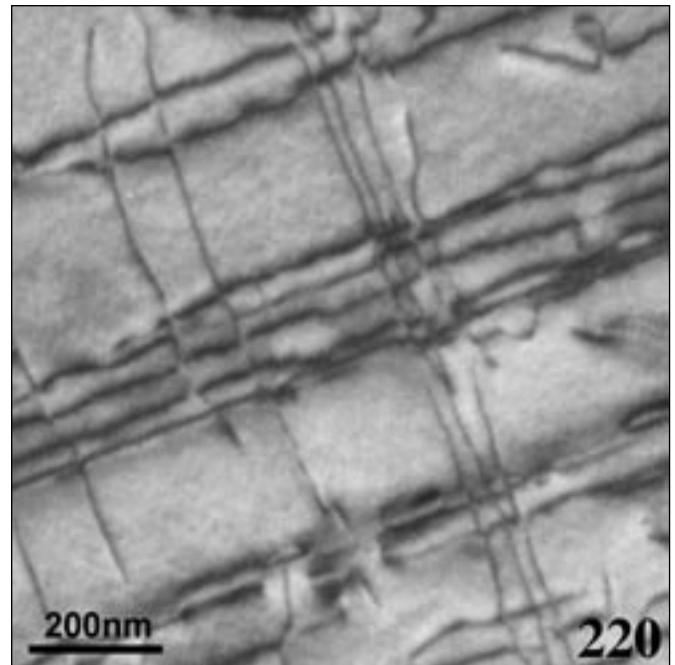


Fig. 2. Micrografía obtenida con la reflexión 220 en Visión Planar para la estructura E-ALMBE. Se observa una red ortogonal de dislocaciones de  $60^\circ$ , con densidad aproximada de  $5 \cdot 10^4 \text{cm}^{-1}$ .

Por otro lado, la red observada en **CS300Ct** aparece paralelamente a una sola dirección  $\langle 110 \rangle$ . Esto corrobora la hipótesis de la escalada por difusión de vacantes de Ga, ya que al no ser químicamente equivalentes los núcleos de las dislocaciones perpendiculares que aparecen en el plano (001) del sistema InGaAs/GaAs, la difusión de vacantes de un solo tipo de átomo favorecerá el movimiento por escalada de un solo tipo de dislocaciones. En las CD, sin embargo, las dislocaciones de Lomer encontradas son diferentes, ya que aparecen en dos direcciones y en fragmentos más cortos, por lo que quizá en este caso sí se hayan formado por el mecanismo de reacción de Fitzgerald (1).

Respecto a las CD, se han observado dislocaciones de  $60^\circ$  a mitad de la epicapa para todas las estructuras, en lugar de la esperada red de Lomer. En **E-MBE** y **D-MBE**, aparecen segmentos cortos de dislocación y en baja densidad, mientras que en **E-ALMBE** observamos una red ortogonal perfectamente definida. La posición de estas dislocaciones sugiere que, en el cambio en las condiciones de crecimiento, deberá producirse una alteración de la superficie que provoque el anclaje de

estos defectos. Según los resultados obtenidos, el paso de un modo de crecimiento por ALMBE (200° C) a MBE (500° C) de forma dinámica o escalonada no altera significativamente la superficie de crecimiento, ya que la densidad de dislocaciones observada es relativamente baja. Sin embargo, cuando se sube la temperatura de 200° hasta 400° C con la misma técnica de crecimiento ALMBE, la superficie de la estructura actúa como si fuera una intercara, anclando las dislocaciones formadas durante la segunda etapa del crecimiento. Esta pseudointercara deberá haber sufrido algún tipo de reconstrucción superficial o alteración anómala que cause el anclaje de las dislocaciones en esta posición. Para aclarar la causa final de este fenómeno harán falta estudios posteriores.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha estudiado por TEM la estructura de defectos de capas simples obtenidas a baja temperatura, así como de CD crecidas por combinación de MBE y ALMBE de forma dinámica y escalonada. Los resultados obtenidos muestran la presencia de una red de dislocaciones de Lomer situada en el seno de la capa para la estructura con capa simple, la cual pudo ser formada por escalada desde la superficie, no encontrándose dicha red en las CD, pese a la relativa similitud en las condiciones de crecimiento utilizadas. En estas estructuras, sin embargo, se observó que al cambiar de baja a alta temperatura a mitad del

crecimiento de la capa se produce una alteración de la superficie de crecimiento que provoca el anclaje en esta posición de las dislocaciones de 60° formadas posteriormente, siendo más drástica para el caso de ALMBE 400°.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo está subvencionado por los proyectos de investigación MAT2000-1625, MAT2001-3362 y por la Junta de Andalucía (PAI TEP-0120).

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. E. A. Fitzgerald, D. G. Ast, P. D. Kirchner, G. D. Pettit y J. M. Woodall. "Structure and recombination in InGaAs/GaAs heteroestructures". *J. Appl. Phys.*, **63**, 693-703 (1988).
2. K. B. Kahen, D. L. Peterson, G. Gajeswaran y D. J. Lawrence. "Properties of Ga vacancies in AlGaAs materials". *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 651-653 (1989).
3. J. S. Tsang, C. P. Lee, S. H. Lee, K. L. Tsai y H. R. Chen. "Kinetics of compositional disordering of AlGaAs/GaAs quantum-wells induced by low-temperature grown GaAs". *J. Appl. Phys.*, **77**, 4302-4306 (1995).
4. O. M. Khreis. "Interdiffusion in InGaAs/GaAs: The effect of growth conditions". *J. Appl. Phys.*, **84(1)**, 232-236 (1998).

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03

